

Обґрунтовано застосування методу дугового паяння для з'єднання труб з низьколегованої сталі та захисним цинковим покриттям діаметром 150 мм та товщиною стінки 3,2 мм, як альтернативи дуговому зварюванню, без пошкодження покриття в місці з'єднання. За результатами досліджень встановлено, що з'єднання виконані дуговим паянням з використанням присадкового дроту CuAl8 , володіють достатньою міцністю та корозійною стійкістю швів

Ключові слова: з'єднання, дугове паяння, цинкові покриття, мікроструктура, мікротвердість, дифузійна зона, метал шва, зона термічного впливу, міцність з'єднання

Обосновано применение способа дуговой пайки для соединения труб из низколегированной стали с защитным цинковым покрытием диаметром 150 мм и толщиной стенки 3,2 мм как альтернативы дуговой сварке, без повреждения покрытия в месте соединения. По результатам исследований установлено, что соединения, выполненные дуговой пайкой, с использованием присадочной проволоки CuAl8 обладают достаточной прочностью и коррозионной стойкостью швов

Ключевые слова: соединения, дуговая пайка, цинковые покрытия, микроструктура, микротвёрдость, диффузионная зона, метал шва, зона термического влияния, прочность соединения

УДК 621.791.317.5

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.70346

РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ З'ЄДНАННЯ ТРУБ ІЗ ЦИНКОВИМ ПОКРИТТЯМ МЕТОДОМ ДУГОВОГО ПАЯННЯ

О. М. Матвієнків

Асистент*

E-mail: olegmatvienkiv@gmail.com

П. М. Присяжнюк

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: pavlo1752010@yandex.ua

В. Д. Миндюк

Кандидат технічних наук, доцент**

E-mail: tinlaven@gmail.com

*Кафедра зварювання конструкцій та
відновлення деталей машин*****Кафедра енергетичного менеджменту і
технічної діагностики******Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15,
м. Івано-Франківськ, Україна, 76019

1. Вступ

Труби із захисними покриттями широко застосовуються для прокладання технологічних трубопроводів, по яких в основному транспортується вода, пара, нафтопродукти, та ін. Зазвичай використовуються труби із внутрішнім діаметром до 150 мм.

Найнадійнішим способом захисту труб від корозії та збільшення терміну їх експлуатації є нанесення тонкого шару металевих захисних покриттів. Найуживанішими для захисту сталевих труб та конструкцій серед відомих металевих покриттів є цинкові. Їх електронегативний потенціал є вищим від заліза, а сам цинк повільніше розчиняється завдяки електрохімічним реакціям. Крім того, цинкові покриття є ефективнішими через низькі затрати і безпечнішими для навколишнього середовища.

Найчастіше для з'єднання оцинкованих труб застосовують електродугове їх зварювання плавким електродом. Однак застосування традиційних електродугових способів зварювання для з'єднання оцинкованих матеріалів створює значні труднощі, зумовлені інтенсивним випаровуванням цинку, що призводить до утворення пор в зварному шві та руйнування цинкового покриття в навколошовній зоні, що потребує додаткових заходів протикорозійного захисту зварного шва та пошкодженої ділянки біля шва.

Альтернативою електродуговому зварюванню труб з цинковим покриттям може бути метод дугового паяння (MIG-паяння), в основі якого є низьке вкладення теплоти в основний метал труб та плавлення тільки присадкового матеріалу [1].

Дослідження та застосування технології дугового паяння для з'єднання труб із цинковим покриттям, без руйнування покриття біля шва, дозволить значно розширити сферу застосування оцинкованих труб в різних галузях, а також продовжити термін їх експлуатації.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Згідно вимог ДСТУ Б В.2.6-193:2013, протикорозійні цинкові покриття, в залежності від агресивності середовища, наносяться на металеві конструкції тонким шаром двома методами: гарячим цинкуванням з отриманням покриття товщиною 60–100 мкм, та металізаційним розпиленням з отриманням покриття товщиною 120–150 мкм.

Плавлення цинку починається при температурі ~420 °С, а при температурі ~906 °С, починається інтенсивне кипіння та випаровування. Все це створює певні труднощі при електродуговому зварюванні конструк-

цій з захисним цинковим покриттям. Випаровування цинку та його оксидів перешкоджає стабільному горінню зварювальної дуги та призводить до утворення дефектів в зварних швах, а саме: пор, гарячих тріщин. Зменшити вплив парів цинку на стабільність горіння дуги можна за рахунок правильного вибору кута нахилу зварювального пальника [2], а також переміщення дуги лівим способом [3].

Однак найрадикальніший спосіб зменшення випаровування цинку при електродуговому зварюванні – це зменшення теплової потужності дуги. Такий спосіб можна реалізувати при застосуванні процесу електродугового паяння.

Завдяки низькій температурі плавлення присадкового матеріалу (від 900 °C до 1100 °C) в процесі дугового паяння основний метал не розплавляється, оскільки температура плавлення сталі є вищою (від 1300 °C до 1500 °C). Тому, на відміну від дугового зварювання, при дуговому паянні зона руйнування цинкового покриття є значно меншою. Як показують дослідження в роботі [4], при електродуговому зварюванні зона руйнування цинкового покриття біля зварного шва досягає 24 мм, а при дуговому паянні всього 1–3 мм.

Також процес дугового MIG-паяння, у порівнянні з дуговим MIG/MAG зварюванням, супроводжується значно меншими випарами шкідливої сполуки ZnO в зварювальному аерозолі [5].

Отримання якісних з'єднань із оцинкованої сталі методом дугового паяння у даний час досягається для листів товщиною, яких не перевищує 1,5 мм. Зокрема, у роботі [6] досліджено паяні з'єднання листів із низьковуглецевої TRIP сталі товщиною 1,5 мм із використанням дроту CuAl8, які характеризуються високим рівнем мікротвердості та міцності. Рівень механічних властивостей з'єднань такого типу та, відповідно, параметри їх мікроструктури регулюються у широкому діапазоні шляхом раціонального вибору режимів дугового паяння оцинкованої сталі, що підтверджується результатами роботи [7], які отримані для листів товщиною 0,8–1,0 мм з'єднаних із використанням дроту CuSi3 із використанням газового середовища різного складу. При паянні оцинкованих сталевих пластин шириною 1–2 мм авторами [8] встановлено, що підвищення рівня теплового впливу при дуговому паянні призводить до інтенсифікації дифузійних процесів і, як наслідок, росту дифузійної зони, ширина якої є ключовим параметром для оцінки рівня міцності. Аналогічні закономірності проявляються при двосторонньому дуговому паянні різнорідних матеріалів, наприклад алюмінієвих сплавів та неіржавіючої сталі, однак максимальна товщина пластин що зварюються не перевищує 2 мм [9].

Тому актуальною проблемою є дослідження дугового паяння пластин товщиною яких перевищує 2 мм, що створює передумови для застосування дугопаяних з'єднань при проектуванні та ремонті трубних конструкцій.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою даної роботи було встановлення факту, чи MIG-паяння дійсно є актуальною альтернативою дуговому зварюванню оцинкованих труб зі збереженням захисного цинкового покриття для їх з'єднання.

Для досягнення вказаної мети вирішувалися наступні задачі:

- дослідження мікроструктури з'єднань, виконаних дуговим зварюванням та MIG-паянням, а саме наявності та особливостей зміни властивостей в металі шва, зоні термічного впливу та лінії сплавлення;
- дослідження впливу кута скосу кромок на властивості дугопаяних з'єднань;
- визначення механічних властивостей отриманих з'єднань за результатами досліджень їх мікротвердості.

4. Матеріали, обладнання та методи досліджень дугопаяних з'єднань

Для проведення досліджень використовувались трубні зразки діаметром 150 мм, товщиною стінки 3,2 мм з низьколегованої сталі 16ГС із захисним цинковим покриттям, нанесеним методом гарячого цинкування.

Дугове зварювання та паяння проводилось з використанням присадкових дротів марок Св–08Г2С, а також CuSi3 та CuAl8. Хімічний склад та механічні властивості присадкових матеріалів наведено в табл. 1.

В якості захисного середовища для електродугового зварювання використовувалась суміш газу Ar(82 %) + CO₂(18 %), а для дугового паяння – чистий аргон, тому що використання суміші аргону з активними газами при дуговому паянні призводить до збільшення зони руйнування покриття [10].

Для електродугового зварювання та паяння обраних трубних зразків було скомпоновано установку із зварювального напівавтомата відомої австрійської фірми «FRONIUS» системи TPS-270i, зварювального обертача та штатива для закріплення зварювального пальника (рис. 1).

Параметри режимів зварювання та дугового паяння наведені в табл. 2.

Таблиця 1

Хімічний склад та механічні властивості присадкових матеріалів

Марка дроту	C, %	Cu, %	Mn, %	Si, %	Al, %	Ni, %	Cr, %	σ _в , МПа	Відносне видовження δ, %	Ударна в'язкість KCV, Дж/см ²
Св–08Г2С (ГОСТ 2246-76)	0,08	–	2,0	0,8	–	0,2	0,2	550	30	70
CuSi3 (ISO 24373)	–	все решту	0,8	2,9	–	–	–	350	40	60
CuAl8 (ISO 24373)	–	все решту	0,2	–	8,0	0,3	–	430	40	100

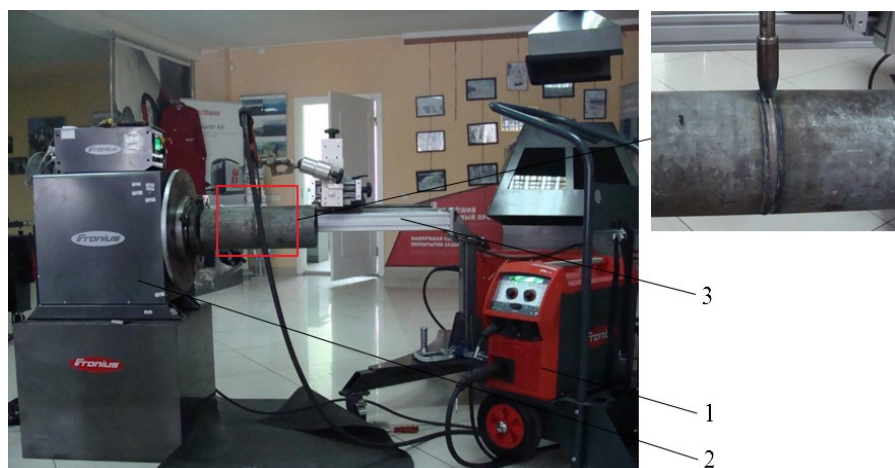


Рис. 1. Зварювальна установка, що застосовувалась в ході досліджень:
1 — зварювальний напівавтомат FRONIUS TPS–270i; 2 — зварювальний обертач;
3 — штатив для закріплення пальника

Таблиця 2

Параметри режимів дугового зварювання та паяння

Тип з'єднання	Марка дроту	Діаметр дроту, мм	Захисний газ	Шар	Напруга дуги U, В	Зварювальний струм I _{зв} , А	Швидкість зварю V _{зв} , см/хв	Швидкість подачі дроту V _{плд} , м/хв
без скосу кромки	CuSi3	1,0	аргон	1	22,1	147	45	9,0
зі скосом кромки	CuSi3	1,0	аргон	1	18,8	100	45	5,3
				2	19,0	105	35	5,5
зі скосом кромки	CuAl8	1,2	аргон	1	19,4	120	40	3,7
				2	19,9	140	40	4,4
зі скосом кромки	Св08Г2С	1,2	Ar 82 % CO ₂ 18 %	1	17,7	150	25	4,0
				2	19	160	28	4,0

Із готових взірців зварних та паяних з'єднань вирізалися темплети для подальших мікроструктурних досліджень.

Для виявлення мікроструктури отриманих зразків з'єднань оцинкованих сталей застосовувалось хімічне травлення. Для травлення, як правило, застосовують слабкі спиртові розчини, або слабкі водні розчини різних кислот, що зменшують швидкість травлення. Якщо в результаті шліфування і полірування на поверхні мікрошліфа утворюється плівка деформованого металу, що погано піддається травленню, то спочатку реактив діє повільно, а по мірі видалення цієї плівки інтенсивність травлення зростає. Повторне переполірування і травлення полегшує отримання мікрошліфів хорошої якості.

Підготовлені поверхні металографічних зразків для виявлення мікроструктури піддавались хімічному травленню 5%-ним спиртовим розчином пікринової кислоти. Її рекомендують застосовувати для травлення вуглецевих і легованих сталей. Вона забезпечує рівномірне травлення, дає структуру з тонкими деталями, не забруднює ферит продуктами травлення, дуже добре виявляє карбіди і перліт.

Для травлення отриманих дуго-паяних з'єднань реактив наливався у фарфорову чашку, підготовлений шліф поміщався чистою відполірованою і про-

митою поверхнею на декілька секунд в реактив. Відомо, що тривалість витримки повинна бути різною для різних типів структур. В даному випадку перлітні структури протравлювались швидко, а феритні більш повільно. Після травлення шліф промивався сильним струменем води, на 1–2 сек. поміщався в чистий спирт і висушувався паперовими серветками, після чого шліф вивчався під мікроскопом для визначення повноти травлення досліджуваної поверхні. Якщо зображення структури було нечітким, то процес травлення повторювався знову.

Застосування сучасних цифрових технологій дозволяє суттєво знизити трудомісткість металографічних досліджень і підвищити об'єктивність кількісних оцінок. Реєстрація зображення мікроструктури в металографічних мікроскопах при цьому здійснюється за допомогою цифрових фото- або відеокамер. Далі зображення вводиться в комп'ютер, де обробляється за допомогою спеціальної програми-аналізатора.

В даній роботі для отримання та реєстрації зображення мікроструктури використовувался мікроскоп ММО-1600АТ, та цифрова камера КММ-5.

Фотографування зображень мікроструктури проводилось пошарово, виділяючи шари, що відповідають різним зонам отриманих з'єднань. Результати мікрофотографування кратністю 100^x зберігались в пам'яті ПЕОМ із спеціалізованим програмним забезпеченням Image J 1.50g, що дозволило виявити морфологічні параметри мікроструктури для подальшого аналізу.

5. Результати досліджень та їх обговорення

На рис. 2, а–г зображено мікроструктури різних зон отриманих дуго-паяних з'єднань при кратності збільшення 100^x.

Як видно із результатів мікроструктурних досліджень паяного з'єднання, отриманого із використанням кремнистої бронзи CuSi3 (рис. 2, а, б), між основним та присадковим металом формується виражена дифузійна зона (шириною ~30 мкм), сформована за рахунок утворення суміші евтектичного типу. Виходячи із характеру взаємодії за умов близьких до рівноважних у подвійній системі Fe-Cu вона складається із евтектичної суміші фериту та твердого розчину на основі Cu (ε-фаза) [11]. Поряд із цим спостерігається інтенсивна дифузія Fe в основу наплавленого

шару, внаслідок чого при кристалізації паяного з'єднання у його структурі виділяються дрібнодисперсні (~1 мкм) фази. Їх форма та характер розподілу свідчить про утворення фаз на основі силіцидів заліза [12], які сприяють зміцненню наплавленого металу за рахунок блокування руху дислокацій відповідно до механізму Орована [13], а також підвищення міцності за рахунок подрібнення розмірів зерен та прояву ефекту Холла-Петча. Наведений характер зміцнення більш виразно проявляється при дуговому паянні дротом із алюмінієвої бронзи (CuAl8) (рис. 2, в) оскільки дисперсні включення у шві представляють собою інтерметалічні фази Fe_xAl_y , рівень фізико-механічних властивостей яких є суттєво вищим порівняно із силіцидними фазами заліза [14], а їх об'ємна концентрація у металі шва є практично у 2 рази вищою, що суттєво посилює ефективність дисперсного зміцнення [15]. При цьому дифузійна зона таких з'єднань характеризується більш дисперсною та рівномірною мікроструктурою.

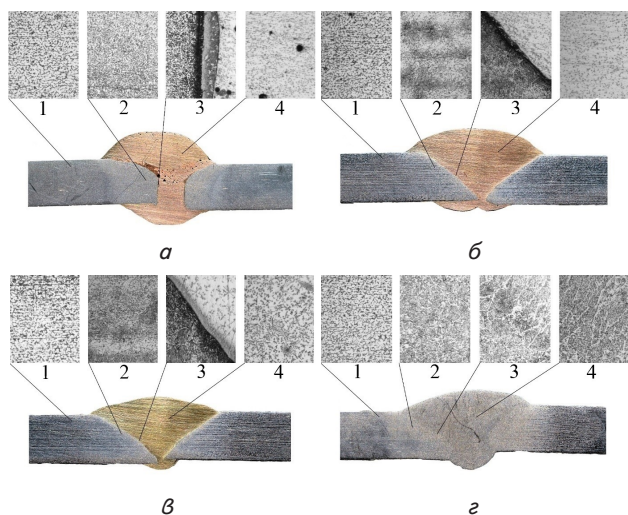
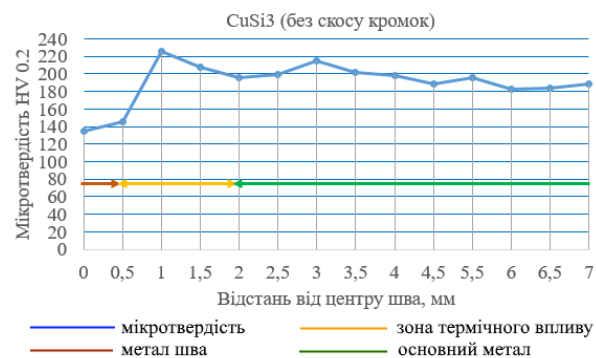


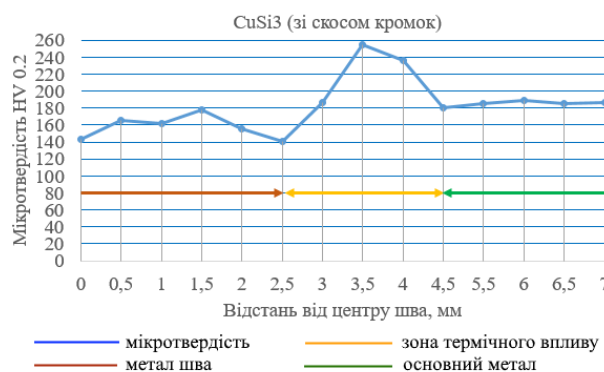
Рис. 2. Макроструктура (3 \times) та мікроструктура (100 \times) з'єднань: а – з прямими кромками дротом CuSi3; б – зі скошеними кромками дротом CuSi3; в – зі скошеними кромками дротом CuAl8; г – зі скошеними кромками дротом Св-08Г2С; 1 – основний метал; 2 – зона термічного впливу; 3 – лінія сплавлення; 4 – метал шва

Формування з'єднань при дуговому паянні відбувається за рахунок дифузійного шару. Дифузійний процес в значній мірі залежить від термічного циклу зварювання та впливає на механічні властивості з'єднань. Щоб оцінити вплив теплоти на розміри зони термічного впливу та її твердість, було проведено вимірювання мікротвердості в перерізі з'єднання від центру шва (рис. 3).

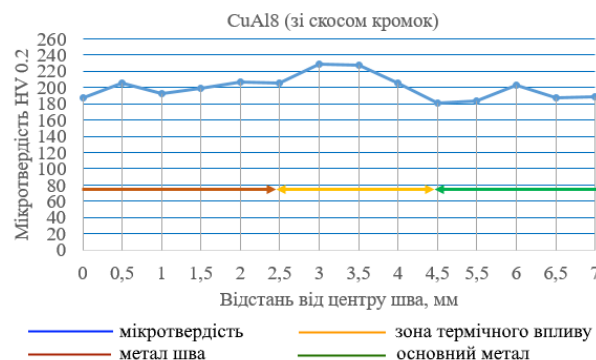
Порівнюючи мікротвердість з'єднань, виконаних дуговим паянням дротами CuSi3 і CuAl8, а також дуговим зварюванням дротом Св-08Г2С, бачимо зростання твердості вздовж зони термічного впливу у всіх візрях. При дуговому паянні дротом CuSi3 (рис. 3, б) зі скосом кромки вклад теплоти був найменший, тому в зоні термічного впливу спостерігається більш висока твердість, викликана низьким вкладенням теплоти, що призводить до швидкого охолодження та росту зерен. Криві мікротвердості показують також, що при дуговому паянні значно зменшується розмір зони термічного впливу.



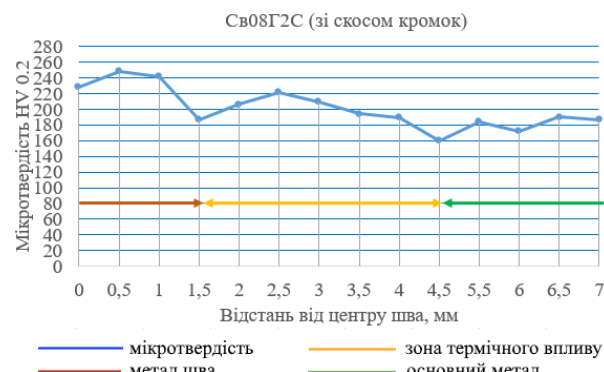
а



б



в



г

Рис. 3. Графіки розподілу мікротвердості по перерізу з'єднань від центру шва: а – з'єднання виконане дротом CuSi3, без скосу кромки; б – з'єднання виконане дротом CuSi3, зі скосом кромки; в – з'єднання виконане дротом CuAl8, зі скосом кромки; г – з'єднання виконане дротом Св-08Г2С, зі скосом кромки

Також слід відмітити, що твердість металу шва, виконаного дротом CuSi3, є значно меншою за твердість основного металу, що свідчить про його невелику міцність. На відміну від застосування вище вказаного присадкового матеріалу, показники твердості шва, виконаного дротом CuAl8 (рис. 3, в), є на рівні з основним металом, а відповідно, і міцність даного шва є практично однаковою з основним металом.

Проведені дослідження показали, що метод дугового паяння може також застосовуватись не тільки для з'єднання тонких листових конструкцій з цинковим покриттям, а також і для з'єднання оцинкованих труб. Але, як відомо, продукти по трубопроводах транспортуються з певним робочим тиском, що може досягати 10 МПа. Тому також потрібно провести дослідження механічних властивостей дуго-паяних з'єднань та розрахунок і дослідження напружено-деформованого стану, що може стати перспективним напрямком подальших досліджень.

6. Висновки

1. Формування з'єднань при дуговому паянні відбувається за рахунок дифузійного шару між швом та основним металом, а міцність з'єднань залежить від розмірів цього шару. З'єднання виконані методом дугового паяння, з використанням дроту на основі міді CuAl8, володіють високою міцністю, оскільки дисперсні включення у шві є у вигляді інтерметалідних фаз Fe_xAl_y , рівень фізико-механічних властивостей яких є суттєво вищим порівняно із силіцидними фазами заліза.

2. Суттєво впливає на міцність дуго-паяних з'єднань тип підготовки кромок, а саме з'єднання зі скосом кромок володіють більшою міцністю, ніж з прямими кромками, так як збільшується зона контакту металу шва з основним металом та площа поперечного перерізу шва.

3. Мікротвердість металу шва, виконаного методом дугового паяння дротом CuAl8 приблизно однакова з основним металом, що свідчить про задовільну міцність даного з'єднання.

Література

1. Миддельдорф, К. Тенденции развития технологий соединения материалов [Текст] / К. Миддельдорф, Д. фон Хофе. // Автоматическая сварка. – 2008. – № 11. – С. 39–47.
2. Шатов, А. П. К вопросу образования пористости при сварке стальных конструкций с антикоррозионным цинковым покрытием [Текст] / А. П. Шатов // Электронный научно-технический журнал. Инженерный вестник. – 2015. – № 3. – С. 6–13. – Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/760131.html>
3. Vinas, J. Mig brazed hot-dip galvanized sheets [Text] / J. Vinas, L. Kascak, M. Abel // Lebanese Science Journal. – 2010. – Vol. 11, Issue 2. – P. 75–85.
4. Лупачёв, А. В. Дуговая сварка и пайка оцинкованных узлов теплотрасс и их коррозионная стойкость [Текст] / А. В. Лупачёв. // Вестник полоцкого государственного университета. – 2012. – № 3. – С. 21–27. – Режим доступа: <http://elib.psu.by:8080/handle/123456789/477>
5. Matusiak, J. Phase analysis of fume during arc weld brazing of steel sheets with protective coatings [Text] / J. Matusiak, J. Wycislik, H. Krztoń // Metalurgija. – 2016. – Vol. 55, Issue 12. – P. 169–172. – Available at: <https://pubweb.carnet.hr/metalurg/arhiva/1090>
6. Varol, F. Influence of current intensity and heat input in Metal Inert Gas-brazed joints of TRIP 800 thin zinc coated steel plates [Text] / F. Varol, E. Ferik, U. Ozsarac, S. Aslanlar // Materials & Design. – 2013. – Vol. 52. – P. 1099–1105. doi: 10.1016/j.matdes.2013.06.054
7. Iordachescu, D. Influence of shielding gases and process parameters on metal transfer and bead shape in MIG brazed joints of the thin zinc coated steel plates [Text] / D. Iordachescu, L. Quintino, R. Miranda, G. Pimenta // Materials & Design. – 2006. – Vol. 27, Issue 5. – P. 381–390. doi: 10.1016/j.matdes.2004.11.010
8. Makwana, D. Gas metal arc brazing of galvanized steel sheets [Text] / P. Makwana, M. Shome, S.-F. Goecke, A. De // Science and Technology of Welding and Joining. – 2016. – P. 1–7. doi: 10.1080/13621718.2016.1145420
9. Zhang, Y. Study on MIG-TIG double-sided arc welding-brazing of aluminum and stainless steel [Text] / Y. Zhang, J. Huang, Z. Cheng, H. Chi, L. Peng, S. Chen // Materials Letters. – 2016. – Vol. 172. – P. 146–148. doi: 10.1016/j.matlet.2016.02.146
10. Pfeifer, T. Braze Welding of Zinc-coated Steel Sheets Using Variable Polarity GMA Flux-cored Welding [Text] / T. Pfeifer, J. Rykalla // Biuletyn instytutu spawalnictwa. – 2015. – Vol. 5 – P. 6–12. doi: 10.17729/ebis.2015.5/1
11. Liu, L. Additive manufacturing of steel-bronze bimetal by shaped metal deposition: interface characteristics and tensile properties [Text] / L. Liu, Z. Zhuang, F. Liu, F. Zhu, M. Zhu // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 69, Issue 9–12. – P. 2131–2137. doi: 10.1007/s00170-013-5191-7
12. Koltsov, A. Wetting and laser brazing of Zn-coated steel products by Cu–Si filler metal [Text] / A. Koltsov, N. Bailly, L. Cretteur // Journal of materials science. – 2010. – Vol. 45, Issue 8. – P. 2118–2125. doi: 10.1007/s10853-009-3949-y
13. Stobrawa, J. Ultrafine grained strips of precipitation hardened copper alloys [Text] / J. Stobrawa, Z. Rdzawski, W. Gluchowski, W. Malec. // Archives of metallurgy and materials. – 2011. – Vol. 56, Issue 1. – P. 171–179. doi: 10.2478/v10172-011-0020-1
14. Zamanzade, M. A Review on the Properties of Iron Aluminide Intermetallics [Text] / M. Zamanzade, A. Barnoush, C. Motz // Crystals. – 2016. – Vol. 6, Issue 1. – P. 10. doi: 10.3390/cryst6010010
15. Akkas, N. Investigation of mechanical properties of metal inert gas-brazed TRIP800 steel joints using different shielding gas flow rate [Text] / N. Akkas, F. Varol, E. Ferik, E. Ilhan, U. Ozsarac, S. Aslanlar // Acta Physica Polonica A. – 2014. – Vol. 125, Issue 2. – P. 473–474. doi: 10.12693/aphyspola.125.473